

## QUAN TRẮC CHUYỂN DỊCH NGANG CÔNG TRÌNH NHÀ CAO TẦNG BẰNG MÁY QUÉT LASER: SO SÁNH GIỮA MÁY QUÉT LOẠI PHA VÀ LOẠI XUNG

Phạm Trung Dũng<sup>1</sup>, Cao Xuân Cường<sup>1</sup>,

Nguyễn Như Tuấn Anh<sup>2</sup>, Nguyễn Văn Hùng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Mở - Địa chất

<sup>2</sup>Công ty Topcon GLS - 2000 Singapore Positioning Pte. Ltd

Ngày nhận bài: 16/7/2021 - Ngày phản biện: 30/7/2021 - Ngày chấp nhận đăng: 13/08/2021

**Tóm tắt.** Máy quét laser mặt đất (TLS) ứng dụng trong công tác quan trắc chuyển dịch ngang công trình nhà cao tầng là một phương pháp mới trong lĩnh vực trắc địa công trình ở Việt Nam. So với GNSS và các thiết bị truyền thống khác (toàn đạc điện tử, thủy chuẩn), TLS có nhiều ưu điểm vượt trội như thời gian quét, mật độ điểm rất lớn và độ chính xác cao. Bài báo này nhằm đánh giá khả năng của TLS trong công tác quan trắc chuyển dịch ngang công trình nhà cao tầng. Nghiên cứu được tiến hành tại tòa nhà cao tầng có độ cao trên 50 m, chuyển dịch ngang được tạo ra bởi một bảng ngấm có thể di chuyển và được đặt trên nóc nhà. Trong thực nghiệm, bảng ngấm được quét ở ba vị trí khác nhau tương ứng với ba chu kỳ đo với hai chất liệu bề mặt khác nhau. Máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X 130 (loại pha) và Topcon GLS - 2000 (loại xung) được sử dụng trong thực nghiệm này. Dữ liệu quét 3D được xử lý trên phần mềm Scence và Collage tương ứng với hai loại máy nêu trên và phần mềm Cloudcompare dùng để phân tích sự dịch chuyển của đám mây điểm. Kết quả phân tích chuyển dịch ngang của công trình nhà cao tầng bằng TLS chỉ ra rằng, trong phạm vi hẹp và độ cao không quá lớn (khoảng 50 m) thì Faro Focus<sup>3D</sup> X 130 có ưu điểm vượt trội cả về thời gian (nhanh hơn hai lần) và mật độ điểm quét (cao gấp bốn lần) so với Topcon GLS - 2000. Độ chính xác xác định dịch chuyển ngang đạt được bởi Faro Focus<sup>3D</sup> X 130 là 1,5 mm và Topcon GLS - 2000 là 3 mm với bề mặt đá hoa. Đối với bề mặt xi măng, độ chính xác này giảm xuống 2 mm và 7 mm tương ứng với hai loại máy nêu trên. Tuy nhiên, máy Topcon GLS - 2000 được trang bị bộ định tâm cho phép bỏ qua thao tác định hướng mô hình cũng như tránh được nguồn sai số này. Các kết quả đã chứng minh rằng hoàn toàn có thể sử dụng máy quét laser trong công tác quan trắc chuyển dịch ngang công trình nhà cao tầng ở nước ta.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quan trắc chuyển dịch biến dạng công trình nói chung và quan trắc chuyển dịch ngang công trình nhà cao tầng là một nhiệm vụ quan trọng và cần được thực hiện thường xuyên nhằm bảo đảm an toàn cho công trình. Có nhiều nguyên nhân gây ra chuyển dịch và biến dạng của công trình nhà cao tầng bao gồm: cấu trúc công trình, thay đổi của tự nhiên không thể dự báo như động đất, và do tải trọng của công trình. Cho đến nay, công nghệ định vị vệ tinh GNSS và các phương pháp truyền thống khác như máy toàn đạc điện tử, máy thủy chuẩn là những thiết bị được sử dụng rộng rãi cho công tác này. Tuy nhiên hạn chế lớn nhất của những phương pháp đang tồn tại là chỉ cho phép quan trắc từng điểm riêng lẻ với số lượng điểm hữu hạn mà không thể hiện được đầy đủ và chính xác chuyển dịch và biến dạng công trình. Ngược lại, quét laser mặt đất (Terrestrial Laser Scanning - TLS) cho phép phân tích chuyển dịch của cả bề mặt đối tượng thông qua hàng triệu điểm đo (còn được biết là đám mây điểm). Trong công nghệ TLS, chuyển dịch của đối tượng quan trắc được phân tích thông qua sự chuyển dịch của hai đám mây điểm tại hai chu kỳ quan trắc. Đây vừa là mấu chốt của công nghệ TLS trong quan trắc biến dạng và chuyển dịch công trình nhưng đồng thời cũng là một thách thức trong việc phân tích và xử lý dữ liệu đám mây điểm. Hiện nay, hai thuật toán phổ biến cho phép xác định sự thay đổi của đám mây điểm là kiểm định thống kê và phương pháp so sánh được trình bày trong nghiên cứu của [18]. Phương pháp kiểm định thống kê chỉ cho phép xác định được hai đám mây điểm có thay đổi hay không nhưng không xác định được độ lớn của giá trị chuyển dịch. Phương pháp so sánh cho phép xác định độ lớn giá trị thay đổi giữa hai đám mây điểm thông qua giá trị độ lệch trung bình và độ lệch chuẩn. Nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp so sánh để tính khoảng cách giữa hai đám mây điểm [8, 10, 19].

TLS đã được chứng minh là một phương pháp ưu việt trong công tác quan trắc chuyển dịch và biến dạng công trình. González - Aguilera và cộng sự đã nghiên cứu ứng dụng TLS để phân tích biến dạng của cấu trúc vật liệu trong phân tích kết cấu [3]. Thiết bị này còn được ứng dụng trong quan trắc biến dạng công trình đường hầm [16], quan trắc đập thủy điện và tháp truyền hình [15]. Trong quan trắc chuyển dịch biến dạng công trình cao tầng, độ chính xác của TLS được so sánh với một số thiết bị truyền thống khác được phân tích bởi [11]. Ngoài ra, Gražulis sử dụng thiết bị này trong phân tích chuyển dịch ngang của ống khói cao khoảng 180 m [4]. Độ chính xác quét laser đạt được ở mức 4 mm khi so sánh với máy toàn đạc độ chính xác cao.

Chất lượng của đám mây điểm phụ thuộc chủ yếu vào đặc điểm cấu tạo, nguyên lý cũng như độ chính xác của máy quét. Hiện nay, các máy quét laser ứng dụng hai nguyên lý chủ yếu trong đo khoảng cách là nguyên lý đo xung và pha. Đánh giá về độ chính xác của thiết bị quét loại xung và loại pha, Chow và cộng sự đã tiến hành so sánh hai thiết bị này bằng cách kiểm định dựa trên điểm và mặt phẳng [2]. Ngoài ra, hai loại máy quét này

được so sánh khi quan trắc biến dạng của hầm được đề cập trong [12]. Trong lĩnh vực khảo cổ học, hai loại máy này còn được so sánh bởi San José Alonso [14]. Tuy nhiên trong quan trắc biến dạng công trình ở nước ta còn thiếu phân tích so sánh ưu nhược điểm của hai loại thiết bị kể trên. Do đó, bài báo này nhằm đánh giá khả năng của máy quét laser trong công tác quan trắc chuyển dịch ngang nhà cao tầng thông qua sự so sánh giữa máy đo loại xung và pha. Thực nghiệm phân tích so sánh được thực hiện đối với hai máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và Topcon GLS - 2000.

Cấu trúc của bài báo được chia thành 4 phần. Phần 2 trình bày nguyên lý đo cơ bản của hai loại máy quét laser loại xung và loại pha và nguyên tắc xác định khoảng cách giữa hai đám mây điểm theo phương pháp Cloud - to - Cloud. Thực nghiệm thu thập dữ liệu được giới thiệu ở phần 3. Trong phần 4, kết quả chuyển dịch của đối tượng quan trắc thu được từ dữ liệu TLS được phân tích và thảo luận. Các kết luận về so sánh hai loại máy quét trong công tác quan trắc chuyển dịch công trình nhà cao tầng được trình bày trong phần cuối của bài báo này.

## 2. NGUYÊN LÝ CỦA MÁY QUÉT LASER VÀ XÁC ĐỊNH KHOẢNG CÁCH GIỮA HAI Đám Mây Điểm

### 2.1. Nguyên lý đo cơ bản của quét laser mặt đất loại xung và loại pha

Nguyên lý đo khoảng cách của máy quét laser mặt đất cũng tương tự như máy toàn đạc điện tử không gương là dựa vào thời gian và vận tốc lan truyền tín hiệu laser. Vì vận tốc của sóng laser có thể xác định nên đo khoảng thời gian lan truyền từ khi ánh sáng phát đi đến khi nó gặp vật phản xạ và quay trở lại bộ phận thu nhận ánh sáng sẽ tính ra được khoảng cách. Phương pháp này còn được biết đến là phương pháp đo thời gian. Hiện nay, máy quét laser mặt đất xác định thời gian dựa trên hai phương pháp cơ bản là xung và pha. Thông thường máy đo khoảng cách loại pha cho phép đạt được tốc độ lưu trữ dữ liệu rất cao (tới một triệu điểm 3D trên giây) nhưng khoảng cách ngắn (nhỏ hơn 100 m). Ngược lại, hệ thống đo khoảng cách loại xung cho phép đo khoảng cách xa (ví dụ 800 m) nhưng tốc độ lưu trữ dữ liệu thấp hơn (thường < 50.000 điểm trên giây) (Vosselman and Maas 2010). Phần tiếp theo của mục này sẽ giới thiệu ngắn gọn về nguyên lý của hai loại máy quét này.

#### a) Phương pháp xung

Phương pháp xung trước đây được biết đến với hệ thống đo khoảng cách bằng sóng radio còn được gọi là radar (radio detection and ranging). Từ khi phát minh ra laser vào cuối thập niên 1950 nó cho phép xác định bề mặt phản xạ với độ phân giải về góc và khoảng cách cao hơn so với sóng radio. Nguyên lý cơ bản của các hệ thống sử dụng năng lượng sóng điện từ để đo khoảng cách là như nhau, chỉ khác nhau ở độ chính xác và mục đích sử dụng. Tính chất cơ bản của sóng điện từ là vận tốc lan truyền của nó. Trong môi trường đã biết, ánh sáng lan truyền với vận tốc hữu hạn và không đổi. Do đó, đo độ trễ của thời gian (cũng như đo thời gian) được tính bởi thời gian lan truyền ánh sáng  $\tau$  từ

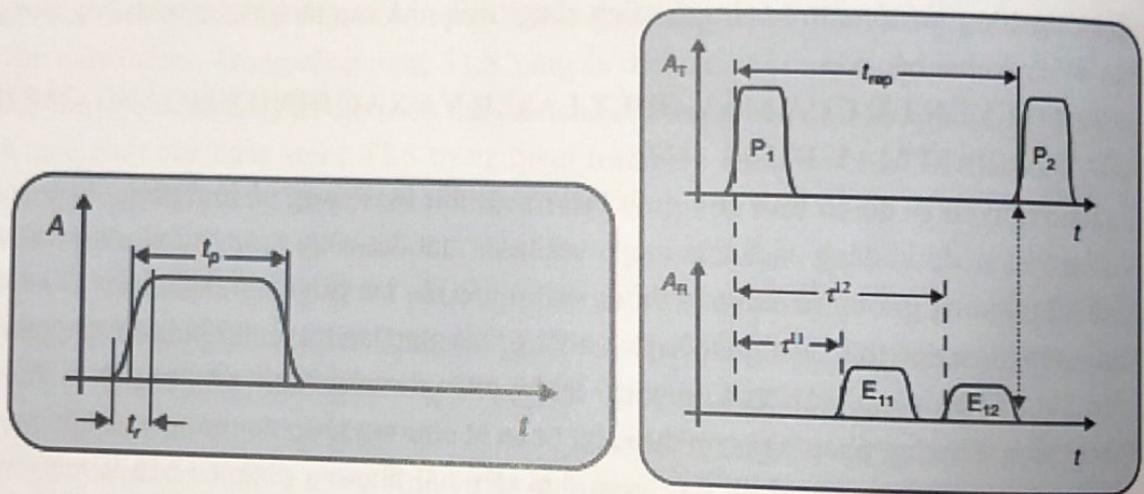
nguồn phát tới bề mặt phản xạ và ngược lại để tính ra khoảng cách  $\rho$ :

$$\rho = \frac{c \tau}{n 2} \quad (1)$$

Trong đó  $c$  là vận tốc sóng điện từ,  $\tau$  là khoảng thời gian lan truyền sóng điện từ, và  $n$  là chiết suất của môi trường lan truyền sóng.

Giá trị vận tốc của sóng điện từ trong chân không hiện tại được xác định là  $c = 299792458$  m/s. Nếu sóng ánh sáng lan truyền trong không khí thì sẽ có một hệ số hiệu chỉnh bằng chỉ số phản xạ. Chỉ số này phụ thuộc vào nhiệt độ, áp suất và độ ẩm của không khí.

Đối với xung sử dụng trong máy đo khoảng cách, hình dạng xung và thời gian xung lặp lại là những đặc điểm quan trọng cần được xem xét. Độ rộng của xung  $t_p$  và độ lớn của xung theo thời gian là hai đặc tính quan trọng khi tìm hiểu về phương pháp đo loại xung được miêu tả như trong Hình 1.



Hình 1. Đặc tính của xung và nguyên tắc đo. Trong đó  $t_p$ : độ rộng của xung;  $t_r$ : độ lớn của xung theo thời gian;  $t_{rep}$ : số lần lặp lại xung;  $\tau$ : thời gian đo

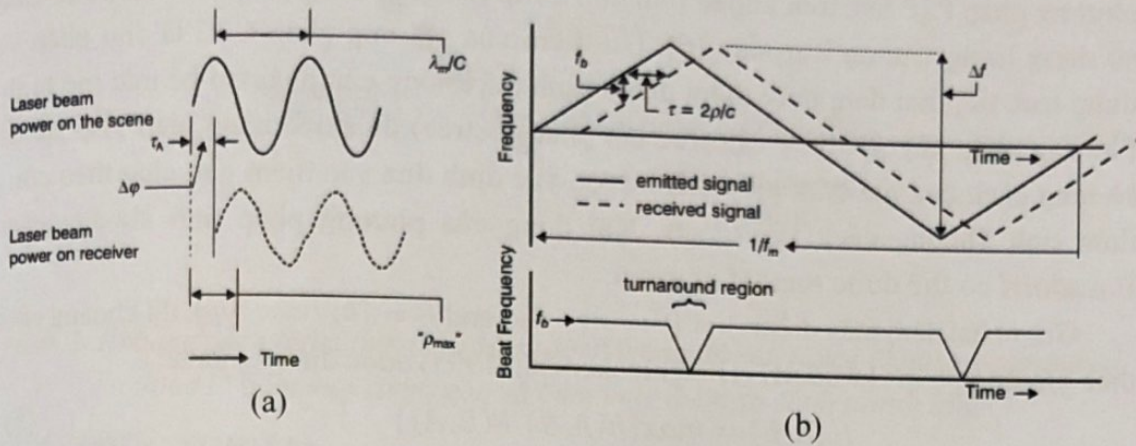
Thông thường độ rộng của xung là  $t_p = 5$  ns tương ứng với khoảng cách 1,5 m đối với vận tốc của ánh sáng, và độ lớn của xung theo thời gian là  $t_r = 1$  ns tương ứng với kích thước khoảng 0,3 m. Từ công thức (1), thời gian tính được là 6,7  $\mu$ s tương ứng với khoảng cách đo 1000 m. Trong máy đo khoảng cách loại xung, thời gian được xác định dựa vào phương pháp xác định thời gian lan truyền của xung. Sai số khoảng cách của một xung đơn đối với nhiễu trắng (gaussian noise) được tính bởi công thức [17]:

$$\delta_{r-p} \approx \frac{c}{2} \frac{t_r}{\sqrt{SNR}} \quad (2)$$

trong đó  $t_r$  là thời gian xung tăng và SNR (signal to noise ratio: tỉ số giữa tín hiệu và nhiễu) là tỉ số năng lượng của tín hiệu trên độ nhiễu. Giả sử rằng  $SNR = 100$ ,  $t_r = 1$  ns, với một bộ đo khoảng thời gian với độ phân giải thì sai số khoảng cách đạt mức 15 mm. Hầu hết các hệ thống quét laser thương mại sử dụng phương pháp xung có độ chính xác về đo khoảng cách đạt từ 5 - 10 mm.

**b) Phương pháp pha**

Ngoài phương pháp xác định thời gian bởi phương pháp xung, thời gian lan truyền của sóng điện từ có thể xác định bởi hiệu pha. Hiệu pha ( $\Delta\varphi$ ) là độ lệch pha giữa tín hiệu phát ra và tín hiệu thu nhận. Đối với tín hiệu là sóng điện từ (sóng hình sin), hiệu pha giữa hai sóng sinh ra độ trễ thời gian ( $\tau = \Delta\varphi/2\pi \times \lambda_m/c$ ) và khoảng cách được tính theo công thức (1). Nguyên tắc đo hiệu pha theo phương pháp điều biến biên độ và điều biến tần số được miêu tả trong Hình 2.



Hình 2. Nguyên lý đo hiệu pha dựa trên bộ điều biến:

(a) Điều biến biên độ AM; (b) Điều biến tần số FM

Sai số của khoảng cách được tính [17]:

$$\delta_{r-AM} \approx \frac{1}{4\pi} \frac{\lambda_m}{\sqrt{SNR}} \quad (3)$$

trong đó  $\lambda_m$  là chiều dài bước sóng của biên độ điều biến (hoặc  $c/f_m$ ). Trong phương pháp pha, số nguyên lần bước sóng không được xác định còn được biết là số nguyên đa trị và được tính bởi [17]:

$$\rho_{max-AM} = \frac{c}{2} \frac{1}{f_m} = \frac{\lambda_m}{2} \quad (4)$$

Để tính được số nguyên đa trị, máy quét sử dụng nhiều tần số khác nhau. Ví dụ, hệ thống điều biến biên độ với hai tần số (10 MHz và 150 MHz) và giá trị  $SNR=1000$ , sai số khoảng cách đạt mức 5 mm và khoảng cách giá là 15 m. Các máy thương mại điển hình có thể quét với tốc độ dữ liệu từ 10 kHz tới khoảng 625 kHz và phạm vi hoạt động tối đa khoảng 100 m.

**2.2. Phương pháp xác định khoảng cách giữa hai đám mây điểm**

Trong bài báo này, phương pháp so sánh hai đám mây điểm Cloud - to - Cloud (C2C) áp dụng trong phần mềm Cloud compare (CC) được tóm tắt như sau. Độ dịch chuyển của đối tượng quan trắc giữa hai chu kỳ được tính trực tiếp bởi sự thay đổi về tọa độ của hai

đám mây điểm tương ứng trong không gian. Một số phương pháp đã được sử dụng để tính khoảng cách giữa hai đám mây điểm có thể tìm trong [7]. Phương pháp so sánh Point - to - Point (P2P) đã được sử dụng rộng rãi trong quan trắc dịch chuyển khi số lượng điểm quan trắc không quá lớn. Phương pháp này còn được biết đến là phương pháp so sánh cặp điểm (point - wisecomparison). Ứng dụng phương pháp P2P trong lĩnh vực quan trắc tại các mỏ khai thác được đề cập trong [9]. Đối với công nghệ quét laser mặt đất, vì số lượng điểm thu được rất lớn (còn được biết là đám mây điểm) nên phương pháp P2P nêu trên không phù hợp để áp dụng, phương pháp C2C được đề xuất sử dụng trong trường hợp này [6]. Ưu điểm của phương pháp C2C là cho phép sử dụng trực tiếp hai đám mây điểm để so sánh mà không cần phải tạo bề mặt mô hình. Phương pháp này áp dụng cấu trúc bát phân (octree) để chia không gian 3D, sau đó khoảng cách của hai đám mây điểm được xác định dựa vào điểm gần nhất theo công thức tính khoảng cách Hausdorff. Nội dung của phương pháp tính khoảng cách Hausdorff có thể được tóm tắt như sau:

Giả sử hai đám mây điểm  $A = \{a_1 \dots a_p\}$  and  $B = \{b_1 \dots b_p\}$ , thì khoảng cách theo phương pháp Hausdorff (Huttenlocher et al. 1993) được định nghĩa là:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (5)$$

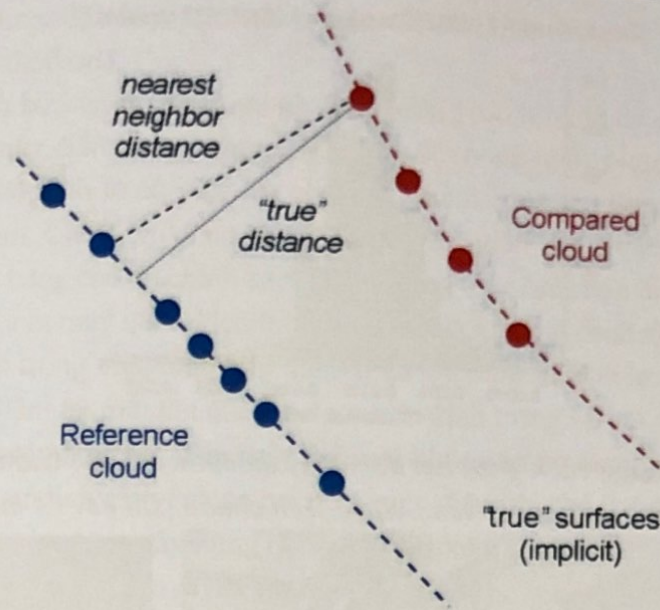
trong đó

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (6)$$

và  $\|\cdot\|$  là chuẩn của A và B (ví dụ theo chuẩn Euclidean).

Hàm  $h(A, B)$  được gọi là khoảng Hausdorff trực tiếp từ A đến B. Phương pháp này cũng được sử dụng trong việc khớp đám mây điểm bởi kỹ thuật điểm gần nhất lặp lại (Iterative closest points - ICP) được định nghĩa bởi [1].

Trong phần mềm CC, phương pháp C2C được sử dụng để tính khoảng cách giữa hai đám mây điểm trong đó một đám mây điểm được coi là đám mây điểm gốc (referencecloud), đám mây điểm còn lại là đám mây điểm dùng để so sánh (comparedcloud). CC sẽ tính khoảng cách từ mỗi điểm của đám mây điểm được so sánh với điểm tương ứng trên đám mây điểm gốc. Khoảng cách giữa hai đám mây điểm được tính theo công thức Hausdorff như trong công thức (5) và được miêu tả như trong Hình 3. Ngoài phương pháp C2C, khoảng cách giữa hai đám mây điểm còn có thể tính theo phương pháp Cloud - to - Mesh (C2M) [13] và đây cũng là phương pháp được sử dụng phổ biến. Tuy nhiên, trong phương pháp C2M độ chính xác phụ thuộc lớn vào bề mặt được mô hình hóa (thường dùng mạng lưới tam giác không đều cạnh TIN). Trong trường hợp bề mặt quan trắc phức tạp hoặc một số điểm đo bị che khuất thì phương pháp C2M không đảm bảo độ chính xác [7]. Phương pháp C2M không được đề cập trong giới hạn nội dung của bài báo này.

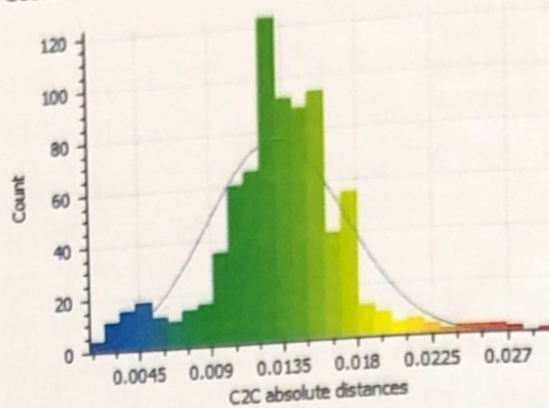


Hình 3. Khoảng cách được tính theo Hausdorff trong đó reference cloud và compared cloud là đám mây điểm gốc và đám mây điểm so sánh tương ứng

### 3. THỰC NGHIỆM

Mục tiêu của bài báo là so sánh ưu nhược điểm về thời gian và độ chính xác của hai loại máy quét laser (loại xung và loại pha) trong việc xác định sự dịch chuyển ngang của công trình nhà cao tầng. Trong thực nghiệm, hai máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và máy Topcon GLS - 2000 được sử dụng để quét tại tòa nhà C12 tầng có độ cao 52 mét trong khuôn viên của Trường Đại học Mỏ - Địa chất vào ngày 20 tháng 3 năm 2021. (xem Hình 5 (a)). Đối tượng quét là tấm bảng vuông có kích thước 60 x 60 cm được đặt trên bệ mốc bằng thép có thể di chuyển được trên thanh ray (xem Hình 5 (b)). Sự dịch chuyển của bảng trên thanh trượt có thể xác định chính xác bằng một thước thép được lắp đặt cố định trên thanh trượt. Sai số xác định các giá trị chuyển dịch nhỏ (centimet) của bảng đo bởi thước thép có thể đạt mức  $\pm 0.2$  mm do sai số ước đọc số trên thước thép. Vì thế giá trị này được coi là giá trị dịch chuyển thực và được dùng để so sánh với chuyển dịch được tính toán từ đám mây điểm trong nghiên cứu này. Để phát hiện sự dịch chuyển ngang của công trình, thực nghiệm tiến hành di chuyển bảng ngắm và mốc trên thanh trượt nằm ngang theo hướng từ máy tới mục tiêu. Máy quét thực hiện đo ba lần (ba chu kỳ) tương ứng với bảng ngắm ở vị trí 0 (chu kỳ 1), và sau đó bảng ngắm được di chuyển 10 mm và 20 mm tương ứng với chu kỳ 2 và 3. Giá trị chuyển dịch được xác định từ đám mây điểm bằng phần mềm CC tính theo phương pháp C2C như đã nêu trong mục 2.2. Hình 4 đưa ra một ví dụ về xác định dịch chuyển của hai đám mây điểm tại giữa hai chu kỳ đo. Giá trị dịch chuyển chính là khoảng cách giữa hai đám mây điểm được xác định bằng khoảng cách trung bình và sai số được đặc trưng bởi độ lệch chuẩn.

Gauss: mean = 0.013123 / std.dev. = 0.004062 [29 classes]



Hình 4. Xác định khoảng cách giữa hai đám mây điểm theo C2C. Giá trị khoảng cách trung bình (mean=13 mm) và độ lệch chuẩn (std.dev=4 mm)



Hình 5. Máy quét Topcon GLS - 2000 (bên trái), máy quét Faro Focus3D X130 (bên phải) (a); Cấu tạo của hệ thống mốc và thanh trượt (b)

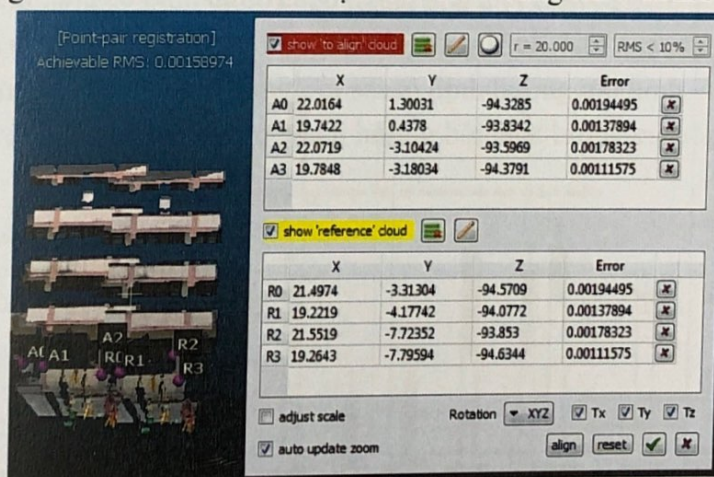
Để so sánh và đánh giá độ chính xác của hai máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và Topcon GLS - 2000, giá trị chuyển dịch của bảng đo được xác định từ đám mây điểm được so sánh với giá trị chuyển dịch thực của nó. Dựa vào đặc điểm khác biệt của hai loại máy quét nêu trên mà các đánh giá được tiến hành với sự thay đổi của các yếu tố bao gồm mật độ điểm quét, sai số định hướng mô hình, và thời gian quét như sau:

Đối với ảnh hưởng của độ phân giải (resolution) đến chất lượng quét (scanquality), thực nghiệm được tiến hành trong hai trường hợp. Trường hợp thứ nhất, hai máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và Topcon GLS - 2000 đều được cài đặt độ phân giải cao nhất (veryhighresolution). Trong đó máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 có độ phân giải cao hơn hai lần (1,5 mm tại khoảng cách 10 m) so với (3,1 mm tại khoảng cách 10 m) của máy GLS - 2000 (xem thông số kỹ thuật của hai máy trên trong Bảng 1). Trường hợp thứ hai, độ phân giải của máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X130 được giảm xuống một nửa bằng thủ tục Subsample trong phần mềm CloudCompare (CC). Trong trường hợp này mật độ điểm của cả hai máy quét trên là tương đương nhau. Trong thực nghiệm này, độ chính xác đo của máy Faro



Focus<sup>3D</sup> X130 được đặt độ chính xác ở mức 4X còn máy Topcon GLS - 2000 đặt ở chế độ tiêu chuẩn (Standard).

Đối với định hướng mô hình, sai số định hướng mô hình là do công tác quá trình định hướng hai đám mây điểm trong cùng một hệ tọa độ thống nhất. Nguyên nhân chính của sai số định hướng mô hình là do việc lựa chọn các điểm cùng tên trong vùng chồng phủ của hai đám mây điểm. Các điểm cùng tên thường được chọn lựa là các tiêu đo (là bảng ngắm hoặc tiêu cầu) để nâng cao độ chính xác. Sai số trong việc lựa chọn điểm cùng tên phụ thuộc vào độ phân giải của máy quét, kích thước tiêu đo và khoảng cách từ máy tới tiêu đo, cũng như sự nhất quán trong việc lựa chọn điểm ở cả hai đám mây điểm. Theo nguyên lý quét laser, đám mây điểm tại mỗi lần quét sẽ được xác định trong hệ tọa độ riêng của máy quét. Hai chu kỳ đo khác nhau, hai đám mây điểm sẽ không trong cùng một hệ tọa độ. Do vậy, để so sánh được sự dịch chuyển của hai đám mây điểm thì thủ tục định hướng mô hình là bắt buộc. Thủ tục này được xây dựng trong phần mềm CC bởi lựa chọn Alignment. Do cấu tạo khác nhau của hai loại máy quét được mà sai số định hướng mô hình cũng khác nhau. Sai số định hướng mô hình đối với dữ liệu quét bằng máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X130 (không có bộ định tâm) là sai số lựa chọn các điểm cùng tên. Trong khi máy Topcon GLS - 2000 (có bộ định tâm laser) sai số này lại do sai số định tâm máy và sai số xác định điểm định hướng của máy (gồm có cả sai số định tâm tiêu). Để xác định được ảnh hưởng của sai số định hướng mô hình đến việc so sánh hai đám mây điểm, thực nghiệm tiến hành với máy Topcon GLS - 2000 được đặt cố định tại một điểm trong cả ba chu kỳ quét và hướng "0" của máy không thay đổi. Trường hợp này không có sai số định hướng mô hình. Sau đó tiến hành định hướng mô hình theo cách xác định các điểm cùng tên ở cả hai đám mây điểm.



Hình 6. Định hướng mô hình đám mây điểm tại hai chu kỳ đo bằng phần mềm Cloudcompare. Ví dụ sai số định hướng mô hình trong trường hợp này là RMS: 0,0016 m.

Ngoài các yếu tố được phân tích, đồ hình hình học do khoảng cách và góc ngưỡng, màu sắc và vật liệu của đối tượng quét cũng như môi trường đo đều có ảnh hưởng nhất định đến chất lượng quét. Tuy nhiên, ảnh hưởng của các yếu tố này không nằm trong giới hạn của bài báo.

Bảng 1. So sánh thông số kỹ thuật của máy quét  
Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và Topcon GLS - 2000

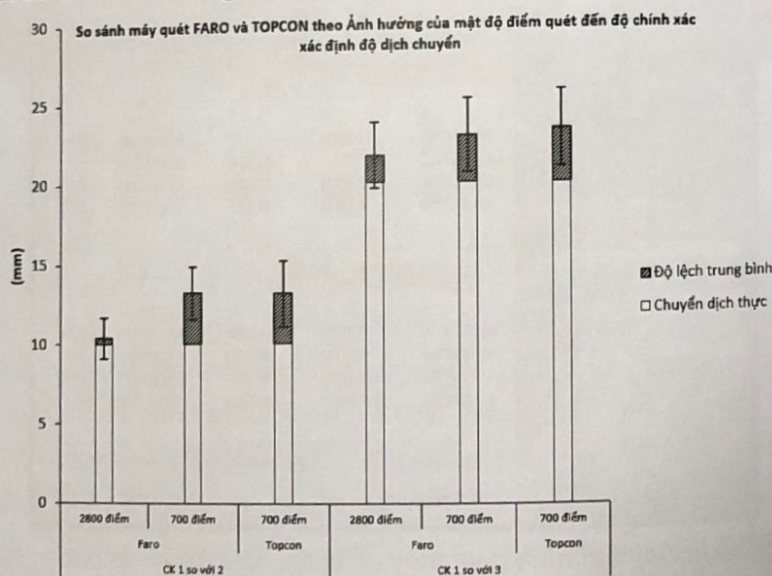
Thông số kỹ thuật	Faro Focus <sup>3D</sup> X130	Topcon GLS - 2000
Kỹ thuật đo	Đo hiệu pha	Đo thời gian (xung)
Trường đo theo mặt phẳng đứng	- 60° - 90°	270°
Trường đo theo mặt phẳng ngang	0° - 360°	360°
Khoảng cách lớn nhất	130 m	350 m
Độ chính xác đo điểm đơn	±2 mm	±3,5 mm (1 - 150 m)
Độ chính xác bề mặt	- - - -	2 mm
Độ chính xác đo góc	18"	6"
Tốc độ quét tối đa	976000 (điểm/giây)	120000 (điểm/giây)
Độ phân giải lớn nhất	1,5 mm tại 10 m	3,1 mm tại 10 m

#### 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để so sánh hai loại máy quét laser như đã nêu trong phần 3, các yếu tố có ảnh hưởng đến độ chính xác quét như mật độ điểm đo và sai số định hướng mô hình được khảo sát. Ngoài ra, thời gian đo cũng là một yếu tố quan trọng được so sánh đối với hai loại máy quét nêu trên.

##### 4.1. Ảnh hưởng của mật độ điểm quét đến độ chính xác

Mục tiêu của phần này là đánh giá ảnh hưởng của mật độ điểm quét đến độ chính xác để từ đó có thể so sánh khả năng của hai loại máy quét theo kỹ thuật đo xung và pha.



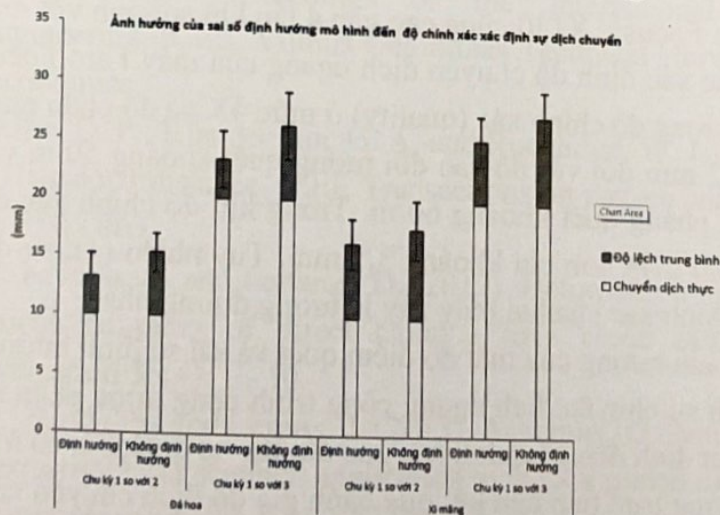
Hình 7. Ảnh hưởng của mật độ điểm quét đến độ chính xác so sánh giữa máy quét  
Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và Topcon GLS - 2000

Hình 2 chỉ ra rằng, mật độ điểm quét là yếu tố có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác khi so sánh ở cùng một máy quét (Faro Focus<sup>3D</sup> X130) trong cả hai chu kỳ. Độ chính xác

giảm nhanh khi giảm mật độ điểm được thể hiện thông qua hai giá trị thống kê gồm độ lệch trung bình và độ lệch chuẩn (standard deviation). Trong đó, độ lệch trung bình là hiệu giữa giá trị chuyển dịch trung bình của đám mây điểm và chuyển dịch thực. Độ chính xác định sự dịch chuyển bởi hai máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và Topcon GLS - 2000 là tương đương nhau khi mật độ điểm quét như nhau. Cả hai giá trị độ lệch trung bình và độ lệch chuẩn của hai máy trong so sánh giữa chu kỳ 1 và 2 và giữa chu kỳ 1 và 3 là tương đương nhau. Như vậy có thể nhận thấy rằng, độ chính xác của máy quét Faro Focus<sup>3D</sup> X130 trong trường hợp này cho phép xác định giá trị chuyển dịch với độ chính xác cao hơn so với máy Topcon GLS - 2000 do mật độ điểm quét lớn hơn. Mặc dù máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 được chọn ở chế độ độ phân giải cao để thu được mật độ điểm quét lớn, tuy nhiên máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 dựa trên kỹ thuật đo hiệu pha nên có tốc độ quét cao hơn rất nhiều so với máy loại xung được sử dụng trong máy Topcon GLS - 2000). Chú ý rằng kết quả trên chỉ được phân tích ở phạm vi nhỏ trong đó khoảng cách từ máy quét đến đối tượng quét và độ cao của đối tượng quét trong phạm vi dưới 60 m.

#### 4.2. Ảnh hưởng sai số định hướng mô hình tới độ chính xác

Sai số định hướng mô hình có ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác xác định sự dịch chuyển của hai đám mây điểm (hay độ dịch chuyển của công trình) từ 1 - 3 mm. Trong thực nghiệm này, sai số định hướng mô hình do sai số bắt tiêu đo được giới hạn trong phạm vi 2 mm (xem Hình 5). và có thể dễ dàng đạt được bởi các tiêu đo được đặt cách xa máy trong phạm vi 10 - 20 m. Các tiêu được cân bằng định tâm bởi bộ định tâm quang học trên các điểm mốc cố định được đặt ở ngoài phạm vi chuyển dịch của công trình hoặc các bảng ngắm được gắn vào phần ổn định của công trình. Kết quả phân tích cũng chỉ ra rằng, độ lệch chuẩn không ảnh hưởng bởi sai số định hướng mô hình, điều này cũng phù hợp với lý thuyết vì độ lệch chuẩn chỉ ảnh hưởng bởi chất lượng của đám mây điểm.



Hình 8. Ảnh hưởng của sai số định hướng đến độ chính xác xác định độ dịch chuyển (trong đó sai số định hướng nhỏ hơn 5 mm)

### 4.3. Thời gian quét

Thời gian quét của máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 với độ phân giải cao nhất (tương ứng với 1,5 mm tại khoảng cách đo 10 m) là khoảng 14 phút, trong khi máy Topcon với độ phân giải cao nhất (3,1 mm tại khoảng cách đo 10 m) là khoảng 12 phút. Nếu cài đặt độ phân giải của máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 tương đương với máy Topcon GLS - 2000 thì thời gian quét sẽ giảm xuống còn khoảng 6 phút. Điều này phù hợp với đặc điểm cấu tạo vào nguyên lý hoạt động của hai loại máy quét loại xung và pha đã được phân tích trong mục 2.1, trong đó máy quét loại pha có ưu thế hơn về tốc độ thu thập dữ liệu. Tuy nhiên sự khác biệt về tốc độ đo kể trên cần phải xem xét đối với từng máy quét cụ thể. Đối với hai máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 và Topcon GLS - 2000 GLS - 200, tốc độ thu dữ liệu của máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 có thể cao hơn máy Topcon khoảng 8 lần nếu đặt chế độ quét nhanh nhất (xem trong Bảng 1 - thông số kỹ thuật của máy). Trong thực tế, nếu cài đặt chế độ phân giải để mật độ điểm quét của hai máy này tương đương nhau, thì tốc độ quét của Faro Focus<sup>3D</sup> X130 chỉ nhanh hơn so với Topcon khoảng 2 lần trong thực nghiệm của bài báo. Sự so sánh ở trên còn đặt trong bối cảnh phạm vi của đối tượng quét trong thực nghiệm được giới hạn ( $40^\circ$  theo phương nằm ngang và  $65^\circ$  theo phương thẳng đứng), và khoảng cách từ máy đến đối tượng quét là khoảng 60 m.

### 5. KẾT LUẬN

Bài báo nhằm mục đích so sánh khả năng của hai loại máy quét laser mặt đất theo nguyên lý đo khoảng cách loại xung và pha trong công tác quan trắc chuyển dịch ngang công trình.

Máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 có ưu thế hơn so với máy Topcon GLS - 2000 về thời gian quét. Đối với một trường hợp cụ thể thời gian quét của nó chỉ bằng một nửa so với máy Topcon GLS - 2000 với mật độ điểm quét tương đương nhau. Mật độ cao nhất có thể đạt được bởi máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 cũng cao gấp 4 lần khi so sánh với máy Topcon GLS - 2000. Độ chính xác xác định độ chuyển dịch ngang của máy Faro Focus<sup>3D</sup> X130 nếu sử dụng chế độ chất lượng độ chính xác (quality) ở mức 4X và độ phân giải (resolution) cao nhất 1/1 nhỏ hơn 2 mm đối với độ cao đối tượng quét khoảng 50 m và khoảng cách từ máy quét đến mặt phẳng quét khoảng 60 m. Trong khi độ chính xác đạt được bởi máy Topcon GLS - 2000 thấp hơn chỉ khoảng 3,5 mm. Tuy nhiên nếu sử dụng cùng mật độ điểm quét thì độ chính xác của hai máy này là tương đương nhau.

Bên cạnh đó, ảnh hưởng của mật độ điểm quét và sai số định hướng mô hình đến độ chính xác xác định sự chuyển dịch ngang công trình cũng được phân tích. Mật độ điểm quét là yếu tố quyết định đến độ chính xác của đối tượng quét. Sai số mô hình là một yếu tố khác có ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả đánh giá độ dịch chuyển của đối tượng quan trắc. Do đó cần phải thiết kế tiêu đo cả về kích thước và vị trí của nó để giảm thiểu nguồn sai số này.

Ngoài những kết quả đã đạt được, giới hạn chính của thực nghiệm trong nghiên cứu này là chiều cao của đối tượng quét chưa đủ lớn để phù hợp với quy mô của công trình nhà siêu cao tầng hiện nay. Ngoài ra, ảnh hưởng của đồ hình hình học, vật liệu quét, và một số yếu tố khác của công trình nhà cao tầng chưa được đề cập trong bài báo này.

Cần tiếp tục nghiên cứu khả năng ứng dụng của thiết bị quét laser cho các đối tượng có chiều cao lớn hơn để có đánh giá khách quan hơn về khả năng của thiết bị TLS trong quan trắc chuyên dịch ngang công trình nhà cao tầng. Đặc điểm về đồ hình hình học ảnh hưởng đến độ chính xác quét laser cũng là yếu tố quan trọng cần được khảo sát. Hơn nữa, quy trình sử dụng máy quét laser trong quan trắc chuyên dịch công trình cũng cần được nghiên cứu để thiết bị TLS sớm được đưa vào sử dụng ở nước ta.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3 - D shapes. Sensor fusion IV: control paradigms and data structures, International Society for Optics and Photonics.
- [2]. Chow, J.; Lichti, D. and Teskey, W. (2012). Accuracy assessment of the Faro Focus3D and Leica HDS6100 panoramic type terrestrial laser scanner through point - based and plane - based user self - calibration. Proceedings of the FIG working week: knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, Italy 610.
- [3]. González - Aguilera, D.; Gómez - Lahoz, J. and Sánchez, J. (2008). A new approach for structural monitoring of large dams with a three - dimensional laser scanner. sensors 8(9): 5866 - 5883.
- [4]. Gražulis, Ž.; Krikštaponis, B.; Neseckas, A.; Popovas, D.; Putrimas, R.; Šlikas, D. and Zigmantienė, E. (2017). The horizontal deformation analysis of high - rise buildings. Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE, Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics ....
- [5]. Huttenlocher, D. P.; Klanderman, G. A. and Rucklidge, W. J. (1993). Comparing images using the Hausdorff distance. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence 15(9): 850 - 863.
- [6]. Jafari, B.; Khaloo, A. and Lattanzi, D. (2017). Deformation tracking in 3D point clouds via statistical sampling of direct cloud - to - cloud distances. Journal of Nondestructive Evaluation 36(4): 1 - 10.
- [7]. Lague, D.; Brodu, N. and Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (NZ). ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing 82: 10 - 26.
- [8]. Lindenbergh, R. and Pfeifer, N. (2005). A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. Proceedings of the 7th Conference on Optical.

- [9]. Little, M. (2006). Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation. Proceedings of the international symposium on stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering, Southern African Institute of Mining and Metallurgy Johannesburg.
- [10]. Mukupa, W.; Roberts, G. W.; Hancock, C. M. and Al - Manasir, K. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. Survey review 49(353): 99 - 116.
- [11]. Mustafin, M.; Valkov, V. and Kazantsev, A. (2017). Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises. Procedia engineering 189: 729 - 736.
- [12]. Nuttens, T.; De Wulf, A.; Deruyter, G.; Stal, C.; De Backer, H. and Schotte, K. (2012). Application of laser scanning for deformation measurements: a comparison between different types of scanning instruments. Proceedings of the FIG Working Week.
- [13]. Oniga, V. and Chirila, C. (2013). Hausdorff distance for the differences calculation between 3D surfaces. Journal of Geodesy and Cadastre RevCAD 15: 193 - 202.
- [14]. San José Alonso, J.; Martínez Rubio, J.; Fernández Martín, J. and García Fernández, J. (2011). Comparing time - of - flight and phase - shift. The survey of the Royal Pantheon in the Basilica of San Isidoro (León). ISPRS Workshop "3D - ARCH.
- [15]. Schneider, D. (2006). Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. Proc. of 3rd IAG/12th FIG Symp., Baden, Austria, May.
- [16]. Van Gosliga, R.; Lindenbergh, R. and Pfeifer, N. (2006). Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. na.
- [17]. Vosselman, G. and Maas, H. - G. (2010). Airborne and terrestrial laser scanning. CRC press.
- [18]. Wujanz, D. (2016). Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring. Technische Universitaet Berlin (Germany).
- [19]. Wujanz, D.; Krueger, D. and Neitzel, F. (2013). Defo Scan++: surface based registration of terrestrial laser scans for deformation monitoring. Proceedings of 2nd Joint International Symposium on Deformation Measurement (JISDM), Nottingham.